

Universität Rostock  
Fakultät für Informatik und Elektrotechnik  
Institut für Nachrichtentechnik  
Albert-Einstein-Straße 26  
D 18059 Rostock

# Versuchsanleitung

# Reflektometer

Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Weber

27. April 2023

## Zusammenfassung

Der vorliegende Versuch dient dem Kennenlernen des Vektornetzwerk-analysators. Hierzu werden Reflektometermessungen durchgeführt. Das Fernsteuern des Vektornetzwerkanalysators vom Arbeitsplatzrechner aus ermöglicht Einblicke in die Laborautomatisierung und ein vertieftes Verständnis der Kalibrierverfahren durch deren Implementierung in Matlab.

## 1. Theorie

### 1.1. Komplexe Wellenamplituden

In der Hochfrequenztechnik beschreibt man den Betriebszustand an einem Tor  $n$  durch die komplexe Wellenamplitude  $\underline{a}_n$  der zulaufenden Welle und die komplexe Wellenamplitude  $\underline{b}_n$  der ablaufenden Welle, siehe Abbildung 1. Die komplexen Wellenamplituden sind derart normiert, dass sich der Betrag der auf das Tor  $n$  zulaufenden Leistung zu

$$|P_{an}| = \frac{1}{2} |\underline{a}_n|^2 \quad (1)$$

ergibt und dass sich der Betrag der von dem Tor  $n$  ablaufenden Leistung zu

$$|P_{bn}| = \frac{1}{2} |\underline{b}_n|^2 \quad (2)$$

ergibt. Die komplexen Wellenamplituden sind in der Bezugsebene bezüglich der Bezugswelle auf dem verwendeten Wellenleitersystem definiert.

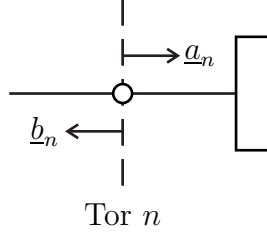


Abbildung 1: Tor mit zulaufender Welle und ablaufender Welle

Speziell bei Zweileitersystemen sind die komplexen Wellenamplituden bezüglich eines Bezugswiderstands  $R_B$  definiert, der dem Wellenwiderstand  $Z_L$  des Wellenleiters entspricht. Bei Zweileitersystemen kann man den Betriebszustand auch durch die Spannung

$$\underline{U}_n = \sqrt{R_B} (\underline{a}_n + \underline{b}_n) \quad (3)$$

und den Strom

$$\underline{I}_n = \frac{1}{\sqrt{R_B}} (\underline{a}_n - \underline{b}_n) \quad (4)$$

am Tor  $n$  beschreiben, die sich durch Überlagerung der zulaufenden Welle und der ablaufenden Welle ergeben. Nach den komplexen Wellenamplituden aufgelöst erhält man

$$\underline{a}(z) = \frac{1}{2} \left( \frac{\underline{U}(z)}{\sqrt{R_B}} + \sqrt{R_B} \underline{I}(z) \right) \quad (5)$$

und

$$\underline{b}(z) = \frac{1}{2} \left( \frac{\underline{U}(z)}{\sqrt{R_B}} - \sqrt{R_B} \underline{I}(z) \right). \quad (6)$$

## 1.2. Streuparameter

Bei linearen Mehrtoren ergeben sich die komplexen Wellenamplituden  $\underline{b}_m$ ,  $m = 1 \dots N$ , der ablaufenden Wellen als lineare Funktionen der komplexen Wellenamplituden  $\underline{a}_n$ ,  $n = 1 \dots N$ , der zulaufenden Wellen, siehe Abbildung 2. Für die komplexe Wellenamplitude der an Tor  $m$  ablaufenden Welle gilt

$$\underline{b}_m = \sum_n \underline{S}_{m,n} \underline{a}_n. \quad (7)$$

Die Koeffizienten  $\underline{S}_{m,n}$  werden als Streuparameter bezeichnet.

Speziell bei Eintoren bezeichnet man den einzigen dort vorhandenen Streuparameter auch als Reflexionsfaktor

$$\underline{\Gamma} = \underline{S}_{1,1} = \frac{\underline{b}_1}{\underline{a}_1}. \quad (8)$$

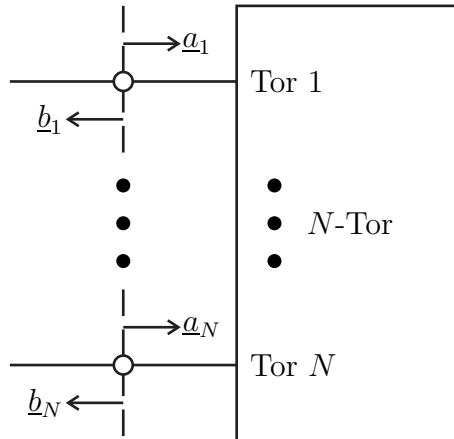


Abbildung 2: Mehrtor

Mit (3) und (4) folgt die Impedanz

$$\underline{Z} = \frac{U_1}{I_1} = R_B \frac{a_1 + b_1}{a_1 - b_1} = R_B \frac{1 + \underline{\Gamma}}{1 - \underline{\Gamma}}. \quad (9)$$

Aufgelöst nach dem Reflexionsfaktor erhält man

$$\underline{\Gamma} = \frac{\underline{Z} - R_B}{\underline{Z} + R_B}. \quad (10)$$

Die Eigenschaften des linearen Eintors kann man durch seinen Reflexionsfaktor  $\underline{\Gamma}$  oder seine Impedanz  $\underline{Z}$  beschreiben.

### 1.3. Aufbau eines Reflektometers

Das Reflektometer dient dem Messen des Reflexionsfaktors  $\underline{\Gamma}_{\text{DUT}}$  eines Messobjekts (Device under Test, DUT). Da nicht nur der Betrag des Reflexionsfaktors  $\underline{\Gamma}_{\text{DUT}}$ , sondern auch das Argument gemessen wird, spricht man von einer vektoriellen Messung. Das Reflektometer entspricht einem Vektornetzwerkanalysator, von dem nur einem Messtor genutzt wird, siehe Abbildung 3.

Wenn es gelänge, die komplexe Wellenamplitude  $\underline{a}$  der auf das Messobjekt zulaufenden Welle und die komplexe Wellenamplitude  $\underline{b}$  der ablaufenden Welle getrennt zu erfassen, so könnte man den Reflexionsfaktor mit

$$\underline{\Gamma}_{\text{DUT}} = \frac{\underline{b}}{\underline{a}} \quad (11)$$

direkt berechnen.

Für eine praktische Realisierung des Reflektometers sind direktive Elemente wie Richtkoppler und Messbrücken verfügbar, die im Idealfall zu den gesuchten Wellen proportionale Wellen an getrennten Toren auskoppeln. Zum Messen der



Abbildung 3: Vektornetzwerkanalysator ZVL von Rohde & Schwarz mit zwei Messtoren

komplexen Wellenamplituden kann man beispielsweise Quadraturdemodulatoren verwenden. Die resultierenden Gleichspannungen in den Inphasekanälen und Quadraturkanälen entsprechen den Realteilen beziehungsweise den Imaginärteilen der zu messenden komplexen Wellenamplituden. Zum Unterdrücken von Rauschen führt man eine Mittelung über eine gewisse Integrationsdauer durch, was im Frequenzbereich einer Filterung mit einer zur Integrationsdauer umgekehrt proportionalen Auflöseseitenbreite (Resolution Bandwidth, RBW) entspricht. Wegen der unbekannt Nullphase des Oszillatorsignals geht die absolute Phaseninformation zunächst verloren. Wenn man in beiden Messkanälempfängern das selbe Oszillatorsignal verwendet, bleibt die hier relevante relative Phaseninformation jedoch erhalten. Man erhält im Idealfall zu den komplexen Wellenamplituden proportionale Messgrößen

$$\underline{a}' \sim \underline{a}$$

und

$$\underline{b}' \sim \underline{b}.$$

Die Proportionalitätsfaktoren des direktiven Elements und die Verstärkungen und Phasenverschiebungen der Messkanälempfänger sind im Idealfall für beide Messgrößen gleich, so dass man den Reflexionsfaktor des Messobjekts direkt als Ver-

hältnis der Messgrößen berechnen kann:

$$\underline{\Gamma}'_{\text{DUT}} = \frac{\underline{b}'}{\underline{a}'}. \quad (12)$$

In der Realität treten signifikante Fehler auf. Neben Imperfektionen des direkten Elements sind dies insbesondere Phasenverschiebungen und Dämpfungen der Verbindungsleitungen zwischen Messgerät und Messobjekt. Man modelliert dieses reale Reflektometer durch ein Viertor an dessen vier Toren

1. das Messobjekt mit Reflexionsfaktor  $\underline{\Gamma}_{\text{DUT}}$ ,
2. die Testsignalquelle,
3. die Messstelle für die komplexe Wellenamplitude  $\underline{a}'$  der hinlaufenden Welle mit Reflexionsfaktor  $\underline{\Gamma}_a$  und
4. die Messstelle für die komplexe Wellenamplitude  $\underline{b}'$  der rücklaufenden Welle mit Reflexionsfaktor  $\underline{\Gamma}_b$

angeschlossen sind, siehe Abbildung 4.

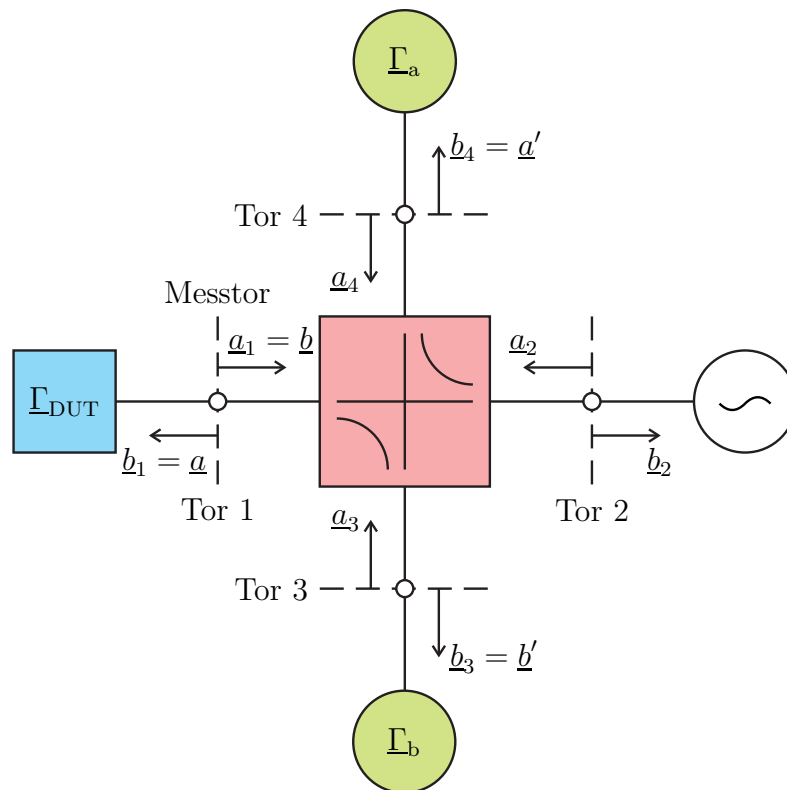


Abbildung 4: Reflektometer

Mit den Reflexionsfaktoren der Messstellen folgen

$$\underline{a}_4 = \underline{\Gamma}_a \underline{a}' \quad (13)$$

und

$$\underline{a}_3 = \underline{\Gamma}_b \underline{b}'. \quad (14)$$

Das Viertor kann durch seine Streuparameter beschrieben werden:

$$\underline{a} = \underline{S}_{1,1} \underline{b} + \underline{S}_{1,2} \underline{a}_2 + \underline{S}_{1,3} \underline{a}_3 + \underline{S}_{1,4} \underline{a}_4, \quad (15)$$

$$\underline{b}_2 = \underline{S}_{2,1} \underline{b} + \underline{S}_{2,2} \underline{a}_2 + \underline{S}_{2,3} \underline{a}_3 + \underline{S}_{2,4} \underline{a}_4, \quad (16)$$

$$\underline{b}' = \underline{S}_{3,1} \underline{b} + \underline{S}_{3,2} \underline{a}_2 + \underline{S}_{3,3} \underline{a}_3 + \underline{S}_{3,4} \underline{a}_4, \quad (17)$$

$$\underline{a}' = \underline{S}_{4,1} \underline{b} + \underline{S}_{4,2} \underline{a}_2 + \underline{S}_{4,3} \underline{a}_3 + \underline{S}_{4,4} \underline{a}_4. \quad (18)$$

Diese Gleichungen stellen ein lineares Gleichungssystem mit sechs Gleichungen und den sechs Unbekannten  $\underline{a}$ ,  $\underline{b}'$ ,  $\underline{a}_2$ ,  $\underline{a}_3$ ,  $\underline{a}_4$  und  $\underline{b}_2$  dar, das heißt man kann  $\underline{a}$  und  $\underline{b}'$  als Funktionen von  $\underline{b}$  und  $\underline{a}'$  berechnen. Unter Verwenden von (13) und (14) erhält man aus (18)

$$\begin{aligned} \underline{a}_2 &= \frac{1}{\underline{S}_{4,2}} \underline{a}' - \frac{\underline{S}_{4,1}}{\underline{S}_{4,2}} \underline{b} - \frac{\underline{S}_{4,3}}{\underline{S}_{4,2}} \underline{a}_3 - \frac{\underline{S}_{4,4}}{\underline{S}_{4,2}} \underline{a}_4 \\ &= \left( \frac{1}{\underline{S}_{4,2}} - \frac{\underline{S}_{4,4} \underline{\Gamma}_a}{\underline{S}_{4,2}} \right) \underline{a}' - \frac{\underline{S}_{4,1}}{\underline{S}_{4,2}} \underline{b} - \frac{\underline{S}_{4,3} \underline{\Gamma}_b}{\underline{S}_{4,2}} \underline{b}'. \end{aligned} \quad (19)$$

Mit (13), (14) und (19) eliminiert man  $\underline{a}_2$ ,  $\underline{a}_3$  und  $\underline{a}_4$  in (15) und (17) und erhält schließlich  $\underline{a}$  und  $\underline{b}'$  als lineare Funktionen von  $\underline{b}$  und  $\underline{a}'$  gemäß

$$\begin{pmatrix} \underline{a} \\ \underline{b}' \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \underline{F}_{0,0} & \underline{F}_{0,1} \\ \underline{F}_{1,0} & \underline{F}_{1,1} \end{pmatrix}}_{\mathbf{F}} \cdot \begin{pmatrix} \underline{b} \\ \underline{a}' \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Abbildung 5 zeigt das so erhaltene Modell des imperfekten Reflektometers. Die Fehler werden durch ein zwischen virtuelles ideales Reflektometer und Messobjekt geschaltetes Fehlerzweitor mit der Streumatrix  $\mathbf{F}$  berücksichtigt. Dieses Fehlerzweitor entspricht keinem direkt physikalisch vorhandenem Zweitor. Das hier geschilderte Vorgehen wird als Viertor-Zweitor-Reduktion bezeichnet [ES91].

#### 1.4. Reflektometerfehlerkorrektur

Mit der Transmissionsmatrix des Fehlerzweitors mit den Streuparametern gemäß (20), siehe Abbildung 5, kann man die am Messobjekt anliegenden komplexen Wellenamplituden aus den vom virtuellen idealen Reflektometer gemessenen komplexen Wellenamplituden berechnen:

$$\begin{pmatrix} \underline{b} \\ \underline{a} \end{pmatrix} = \frac{1}{\underline{F}_{1,0}} \begin{pmatrix} 1 & -\underline{F}_{1,1} \\ \underline{F}_{0,0} & -\det(\mathbf{F}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{b}' \\ \underline{a}' \end{pmatrix}. \quad (21)$$

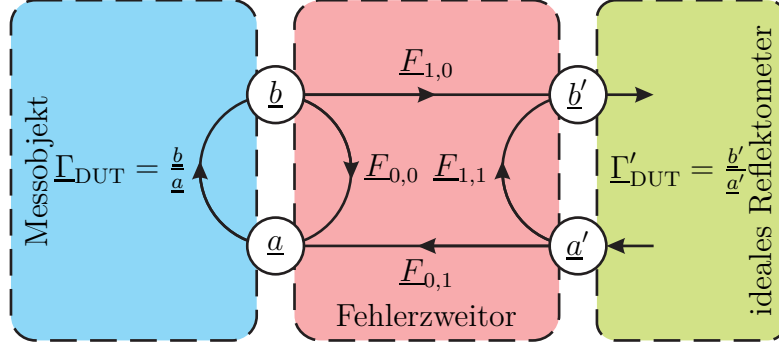


Abbildung 5: Modell des imperfekten Reflektometers

Für den Reflexionsfaktor (11) des Messobjekts folgt

$$\Gamma_{\text{DUT}} = \frac{b}{a} = \frac{b' - E_{1,1}a'}{E_{0,0}b' - \det(\mathbf{F})a'} = \frac{\Gamma'_{\text{DUT}} - E_{1,1}}{E_{0,0}\Gamma'_{\text{DUT}} - \det(\mathbf{F})}, \quad (22)$$

das heißt bei Kenntnis der drei Fehlerterme  $\det(\mathbf{F})$ ,  $E_{0,0}$  und  $E_{1,1}$  kann man den Reflexionsfaktor  $\Gamma_{\text{DUT}}$  des Messobjekts aus den gemessenen komplexen Wellenamplituden  $a'$  und  $b'$  oder dem gemessenen Reflexionsfaktor  $\Gamma'_{\text{DUT}}$  gemäß (12) berechnen. Man spricht daher auch vom 3-Term-Fehlermodell. In der Literatur [Hie11] wird der Anschauung wegen üblicherweise statt  $\det(\mathbf{F})$  der bei Kenntnis der übrigen Fehlerterme  $E_{0,0}$  und  $E_{1,1}$  äquivalente Fehlerterm

$$E_{0,1}E_{1,0} = E_{0,0}E_{1,1} - \det(\mathbf{F})$$

verwendet. Die Fehlerterme werden dann wie folgt bezeichnet:

**Reflexionsgleichlauf:**  $E_{0,1}E_{1,0}$

**Direktivität:**  $E_{1,1}$

**Messtoranpassung:**  $E_{0,0}$

Bemerkenswert ist, dass nur das Produkt  $E_{0,1}E_{1,0}$ , nicht aber  $E_{0,1}$  und  $E_{1,0}$  für die Korrekturrechnung (22) benötigt werden.

Die drei Fehlerterme bestimmt man durch Messungen an drei Kalibrierstandards exakt bekannten Reflexionsfaktors. Beim OSM-Verfahren verwendet man folgende Kalibrierstandards:

**Leerlauf (OPEN):** wahrer Reflexionsfaktor  $\Gamma_{\text{O}}$ , gemessener Reflexionsfaktor  $\Gamma'_{\text{O}}$

**Kurzschluss (SHORT):** wahrer Reflexionsfaktor  $\Gamma_{\text{S}}$ , gemessener Reflexionsfaktor  $\Gamma'_{\text{S}}$

**Abschluss (MATCH):** wahrer Reflexionsfaktor  $\Gamma_{\text{M}}$ , gemessener Reflexionsfaktor  $\Gamma'_{\text{M}}$

Reale Kalibrierstandards wie die in Abbildung 6 gezeigten haben in nicht vernachlässigbarer Weise von den Reflexionsfaktoren eines idealen Leerlaufs, Kurzschlusses beziehungsweise Abschlusses abweichende Reflexionsfaktoren. Hersteller von Kalibrierstandards legen daher für jeden Kalibrierstandard individuell mit geeichten Messgeräten bei verschiedenen Frequenzen  $f$  gemessene Kalibrierdaten bei oder stellen parametrisierte Ersatzschaltbilder der Kalibrierstandards zur Verfügung. Das im Folgenden beschriebene Verfahren zum Ermitteln der Fehlerterme ist von den konkreten Kalibrierstandards unabhängig und kann somit Imperfektionen der Kalibrierstandards berücksichtigen.



Abbildung 6: Kalibrierkit 53K34R-MSON3 von Rosenberger bestehend aus Leerlauf, Kurzschluss und Abschluss in kompakter Bauform

Aus (22) folgt

$$\underline{\Gamma}' \underline{\Gamma} \underline{E}_{0,0} - \underline{\Gamma} \det(\underline{\mathbf{F}}) = \underline{\Gamma}' - \underline{E}_{1,1}. \quad (23)$$

Dies ist eine lineare Gleichung für die drei Fehlerterme  $\det(\underline{\mathbf{F}})$ ,  $\underline{E}_{0,0}$  und  $\underline{E}_{1,1}$ , in welcher der wahre Reflexionsfaktor  $\underline{\Gamma}$  und der zugehörige gemessene Reflexionsfaktor  $\underline{\Gamma}'$  vorkommen. Durch Einsetzen der drei Paare wahrer und gemessener Reflexionsfaktoren der drei Kalibrierstandards erhält man ein eindeutig lösbares lineares Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} \underline{\Gamma}'_O \\ \underline{\Gamma}'_S \\ \underline{\Gamma}'_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \underline{\Gamma}'_O \underline{\Gamma}_O & -\underline{\Gamma}_O \\ 1 & \underline{\Gamma}'_S \underline{\Gamma}_S & -\underline{\Gamma}_S \\ 1 & \underline{\Gamma}'_M \underline{\Gamma}_M & -\underline{\Gamma}_M \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{E}_{1,1} \\ \underline{E}_{0,0} \\ \det(\underline{\mathbf{F}}) \end{pmatrix}.$$

Die Lösung ist

$$\begin{pmatrix} \underline{E}_{1,1} \\ \underline{E}_{0,0} \\ \det(\underline{\mathbf{F}}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \underline{\Gamma}'_O \underline{\Gamma}_O & -\underline{\Gamma}_O \\ 1 & \underline{\Gamma}'_S \underline{\Gamma}_S & -\underline{\Gamma}_S \\ 1 & \underline{\Gamma}'_M \underline{\Gamma}_M & -\underline{\Gamma}_M \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \underline{\Gamma}'_O \\ \underline{\Gamma}'_S \\ \underline{\Gamma}'_M \end{pmatrix}. \quad (24)$$



Falls mehr als die minimal erforderlichen drei Kalibrierstandards verwendet werden, kann man die zusätzlichen Messwerte im Rahmen einer Ausgleichsrechnung zur Messfehlerreduktion nutzen.

## 1.5. Laborautomatisierung

Wie am Beispiel des Reflektometers gezeigt wurde, sind zum Lösen einer Messaufgabe in der Hochfrequenztechnik wie zum Beispiel dem Bestimmen des fehlerkorrigierten Reflexionsfaktors eines Messobjekts häufig mehrere Messungen und ein Verarbeiten der Messergebnisse erforderlich. Es ist sinnvoll, diesen aufwändigen und fehleranfälligen Prozess zu automatisieren.

Heutige Messgeräte der Hochfrequenztechnik enthalten einen Rechner und Programme zum Durchführen der gängigsten Messaufgaben. Dieser Ansatz gerät an seine Grenzen, wenn zum Durchführen der Messaufgabe ein aus mehreren Messgeräten bestehender Messplatz benötigt wird. Auch ist es häufig wünschenswert, anwendungsspezifische Messverfahren zu automatisieren. Eine Lösung besteht darin, die Messgeräte durch einen separaten Arbeitsplatzrechner fernzusteuern.

Die Kommunikation auf der physikalischen Ebene kann über verschiedene standardisierte Schnittstellen erfolgen:

**RS232** ist eine einfache, robuste aber auch langsame serielle Schnittstelle für Punkt-zu-Punkt Verbindungen, die zum Verbinden eines einzelnen Messgerätes mit dem Arbeitsplatzrechner geeignet ist. Vorteilhaft ist, dass auch die einfachen in kleineren Messgeräten anzutreffenden Mikrocontroller diese Schnittstelle unterstützen.

**GPIB** ist eine klassische parallele, speziell zur Steuerung von Messgeräten entworfene Busschnittstelle, die immer noch häufig eingesetzt wird. Leider ist diese Schnittstelle etwas veraltet, was sich zum Beispiel darin äußert, dass jedem an den Bus angeschlossenen Messgerät manuell eine individuelle Adresse zugewiesen werden muss.<sup>1</sup>

**USB** ist eine moderne serielle Schnittstelle, die aufgrund der Sternverkabelung und der geringen Anzahl an USB-Schnittstellen an Arbeitsplatzrechnern eher zum Verbinden einzelner Messgeräte mit dem Arbeitsplatzrechner geeignet ist. Die USB-Schnittstelle ist beim mobilen Einsatz vorteilhaft, da auch Laptops und Tablets über diese Schnittstelle verfügen.

**Ethernet** ist eine moderne, schnelle, auch für größere Messplätze mit vielen Messgeräten geeignete Schnittstelle. Nachteilig sind die Sicherheitsrisiken, da auf vielen Messgeräten veraltete Betriebssystemversionen eingesetzt werden.

---

<sup>1</sup>Die voreingestellte Adresse des Vektornetzwerkanalysators ist 20.

Der Einsatz von Funkschnittstellen wie WLAN oder Bluetooth in der Hochfrequenzmesstechnik ist problematisch, da Interferenzen mit den zu messenden Signalen auftreten können.

Die Virtual Instrument Software Architecture (VISA) stellt eine einheitliche Softwareschnittstelle für die Anwenderprogramme zur Verfügung. Die Anwenderprogramme kommunizieren mit den Messgeräten mittels Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI) [SCPI]. Es handelt sich um Textnachrichten, die an das Messgerät gesendet werden. Auf SCPI-Befehle, die mit einem Fragezeichen ? abschließen, sendet das Messgerät eine Antwort. Es gibt einen kleinen Kern obligatorischer mit \* beginnender SCPI-Befehle, die alle Messgeräte unterstützen müssen, siehe Tabelle 1. Darüber hinaus gibt es gerätespezifische SCPI-Befehle, die in den jeweiligen Handbüchern der Messgeräte dokumentiert sind.

Tabelle 1: Obligatorische SCPI-Befehle

Befehl	Beschreibung
*CLS	Clear Status Command
*ESE	Standard Event Status Enable Command
*ESE?	Standard Event Status Enable Query
*ESR?	Standard Event Status Register Query
*IDN?	Identification Query
*OPC	Operation Complete Command
*OPC?	Operation Complete Query
*RST	Reset Command
*SRE	Service Request Enable Command
*SRE?	Service Request Enable Query
*STB?	Read Status Byte Query
*TST?	Self-Test Query
*WAI	Wait-to-Continue Command

Im Rahmen dieses Labors werden die Anwenderprogramme mit Matlab und der Instrument Control Toolbox erstellt [TG13]. Die verwendete Softwarearchitektur sieht

- eine Matlab-Funktion `vna_connect` zum Aufbau der Verbindung zum Vektornetzwerkanalysator,
- Matlab-Funktionen `vna_parameters` und `vna_port1` zum Durchführen von Messaufgaben und
- eine Matlab-Funktion `vna_disconnect` zum Schließen der Verbindung vor.

Die gesamte gerätespezifische Kommunikation ist in diesen Matlab-Funktionen konzentriert. Darauf aufbauende Matlab-Skripte zum Steuern komplexer Messabläufe wie `reflektometer_port1` und Matlab-Funktionen zum Verarbeiten der

Messwerte wie `osm` sind hardwareunabhängig. Beim Aufbau der Verbindung zum Vektornetzwerkanalysator mit `vna_connect` wird der zu verwendende Vektornetzwerkanalysator spezifiziert. Wird hier ein realer Vektornetzwerkanalysator wie `'zv1'` angegeben, werden in der Folge reale Messungen durchgeführt und die Messergebnisse werden in Dateien abgespeichert. Wird hier jedoch kein Vektornetzwerkanalysator `'none'` angegeben, dann werden in der Folge virtuelle Messungen durchgeführt, bei denen in Dateien abgespeicherte Messergebnisse zurückgegeben werden. Diese Softwarearchitektur ermöglicht es, Matlab-Skripte zum Steuern komplexer Messabläufe und Matlab-Funktionen zum Verarbeiten der Messwerte zunächst ohne einen realen Vektornetzwerkanalysator zu entwickeln und zu testen.

## 2. Versuchsvorbereitung

**Aufgabe 1** Berechnen Sie die Streuparameter  $\underline{E}_{0,0}$ ,  $\underline{E}_{0,1}$ ,  $\underline{E}_{1,0}$  und  $\underline{E}_{1,1}$  des Fehlerzweiters bei Verwenden reflexionsfreier Messstellen  $\underline{\Gamma}_a = 0$  und  $\underline{\Gamma}_b = 0$  und eines idealen Richtkopplers mit  $\underline{S}_{1,1} = \underline{S}_{1,4} = \underline{S}_{2,2} = \underline{S}_{2,3} = \underline{S}_{3,2} = \underline{S}_{3,3} = \underline{S}_{4,1} = \underline{S}_{4,4} = 0$ ,  $\underline{S}_{1,2} = \underline{S}_{2,1} = \underline{S}_{3,4} = \underline{S}_{4,3}$  und  $\underline{S}_{1,3} = \underline{S}_{2,4} = \underline{S}_{3,1} = \underline{S}_{4,2}$ !

**Aufgabe 2** Berechnen Sie die Streuparameter der in Abbildung 7 gezeigten Messbrücke! Betrachten Sie hierzu zunächst den Betriebszustand  $\underline{a}_1 = \underline{a}_3 = \underline{a}_4 = 0$ , den Sie durch reflexionsfreien Abschluss der Tore 1, 3 und 4 mit dem Bezugswiderstand  $R_B$  erzwingen können. Nutzen Sie weiterhin die vollständige Symmetrie der Schaltung bezüglich aller vier Tore aus.

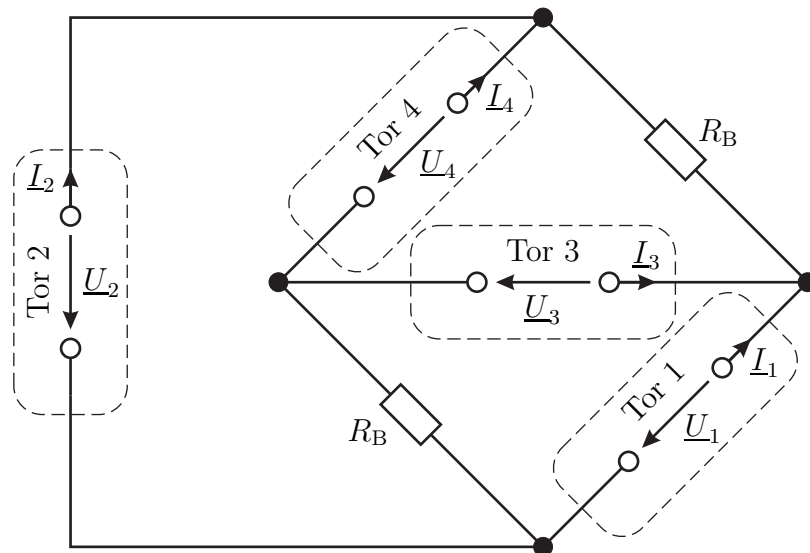


Abbildung 7: Messbrücke

**Aufgabe 3** Wie vereinfachen sich die Gleichungen (24) zum Berechnen der drei Fehlerterme  $\det(\underline{\mathbf{F}})$ ,  $\underline{F}_{0,0}$  und  $\underline{F}_{1,1}$ , falls ideale Kalibrierstandards  $\underline{\Gamma}_O = 1$ ,  $\underline{\Gamma}_S = -1$  und  $\underline{\Gamma}_M = 0$  verwendet werden?

**Aufgabe 4** Während der Abschluss in der Regel als idealer  $50\ \Omega$ -Widerstand angesehen werden kann, treten bei den übrigen Kalibrierstandards signifikante Abweichungen von den idealen Bauelementen auf, die durch Ersatzschaltbilder modelliert werden können.

Beim realen Kurzschluss ist im wesentlichen die elektrische Länge  $l_S$  der Leitung zwischen idealem Kurzschluss und der Bezugsebene im Steckverbinder zu berücksichtigen, siehe Abbildung 8. Unter der elektrischen Länge  $l_S$  versteht man die Länge einer äquivalenten luftgefüllten Leitung. In der zur Verfügung gestellten Datei `short.dat` finden Sie mit einem genauen kalibrierten Reflektometer bei verschiedenen Frequenzen  $f_n$ ,  $n = 1 \dots N$ , gemessene Reflexionsfaktoren  $\Gamma'_S(f_n)$  des realen Kurzschlusses.<sup>2</sup> Parametrisieren Sie das Modell des realen Kurzschlusses, das heißt bestimmen Sie die elektrische Länge  $l_S$ ! Sie können hierzu ausnutzen, dass das Argument  $\pi - 4\pi f \frac{l_S}{c_0}$  des Reflexionsfaktors

$$\underline{\Gamma}_S(f) = -e^{-j4\pi f \frac{l_S}{c_0}} \quad (25)$$

eine lineare Funktion der Frequenz  $f$  ist [Tre85].<sup>3</sup> Berechnen Sie aus den Messdaten zunächst eine Ausgleichsgerade, aus deren Steigung sich die Länge  $l_S$  leicht berechnen lässt. Vervollständigen Sie hierzu das Matlab-Skript `parameter`. Sie können die Matlab-Funktion `polyfit` verwenden [TG13]. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den Herstellerangaben im Datenblatt!

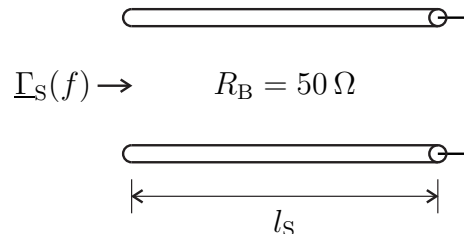


Abbildung 8: Ersatzschaltbild des Kurzschlusses

Beim realen Leerlauf ist im Allgemeinen neben der elektrischen Länge  $l_O$  der Leitung die frequenzabhängige Streukapazität  $C(f)$  am offenen Leitungsende zu berücksichtigen, siehe Abbildung 9. Die frequenzabhängige Streukapazität wird üblicherweise durch ein Polynom

$$C(f) = C_0 + C_1 f + C_2 f^2 + C_3 f^3 \quad (26)$$

dritten Grades approximiert.

<sup>2</sup>Die Reflexionsfaktoren wurden mit einem Vektornetzwerkanalysator ZVB von Rohde & Schwarz, der mit dem Kalibrierkit RPC-N von Rosenberger kalibriert wurde, gemessen.

<sup>3</sup>Die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist  $c_0 = 2,997\,925 \cdot 10^8\ \text{m s}^{-1}$ .

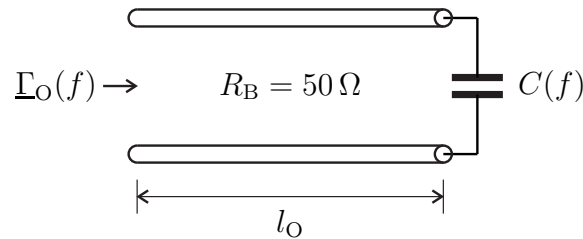


Abbildung 9: Ersatzschaltbild des Leerlaufs

Im Folgenden soll die Streukapazität  $C(f)$  vernachlässigt werden. Parametrisieren Sie das Modell des realen Leerlaufs, das heißt bestimmen Sie die elektrische Länge  $l_O$  der Leitung zwischen idealem Leerlauf und der Bezugsebene im Steckverbinder! Sie können hierzu wieder ausnutzen, dass das Argument  $-4\pi f \frac{l_O}{c_0}$  des Reflexionsfaktors

$$\Gamma_O(f) = e^{-j4\pi f \frac{l_O}{c_0}} \quad (27)$$

eine lineare Funktion der Frequenz  $f$  ist und das gleiche Verfahren wie beim Parametrisieren des Modells des realen Kurzschlusses einsetzen. Die gemessenen Reflexionsfaktoren  $\Gamma'_O(f_n)$ ,  $n = 1 \dots N$ , des realen Leerlaufs finden Sie in der Datei `open.dat`. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den Herstellerangaben im Datenblatt!

**Aufgabe 5** Implementieren Sie die Reflektometerfehlerkorrektur in Matlab! Verwenden Sie hierzu die zur Verfügung gestellten Matlab-Programmfragmente und nehmen Sie die notwendigen Ergänzungen in der Matlab-Funktion `osm` vor. Testen Sie Ihre Reflektometerfehlerkorrektur mit Hilfe der zur Verfügung gestellten abgespeicherten Messdaten. Kopieren Sie hierzu die Dateien `open_port1.txt`, `short_port1.txt`, `match_port1.txt`, und `dut_port1.txt` aus dem jeweiligen Unterverzeichnis in das Arbeitsverzeichnis.

### 3. Versuchsdurchführung

**Aufgabe 6** Im Folgenden sollen Sie sich anhand einiger exemplarischer SCPI-Befehle mit der Fernsteuerung des Vektornetzwerkanalysators vertraut machen.

- Es ist stets sinnvoll, zunächst mittels `*RST` einen definierten Ausgangszustand herzustellen.
- Nun können Sie mittels `*IDN?` die Geräteerkennung abfragen.
- Stellen Sie mit dem Befehl `[SENSE<Ch>:]FREQUENCY:STOP <stop_frequency>` eine Stopfrequenz von 100 MHz ein.
- Um sicherzugehen, dass die gewünschte Stopfrequenz auch wirklich eingestellt werden konnte, können Sie nun die aktuelle Stopfrequenz abfragen.

Zum Senden der SCPI-Befehle und zum Empfangen der Antworten können Sie das Programm *RSCOMMANDER* verwenden. Informieren Sie sich im Handbuch des Vektornetzwerkanalysators über die zu erwartende Wirkung der Befehle und vergleichen Sie diese mit Ihren Beobachtungen! Versuchen Sie auch einmal, eine Stopfrequenz außerhalb des zulässigen Bereichs einzustellen. Untersuchen Sie auch die Wirkung des SCPI-Befehls `*RST` auf die eingestellte Stopfrequenz.

**Aufgabe 7** Bestimmen Sie die Reflexionsfaktoren

- eines Leerlaufs (offenes Leitungsende) und
- eines  $25\ \Omega$ -Widerstands

als Funktionen der Frequenz  $f$  und stellen Sie die Ergebnisse im Smith-Diagramm dar! Verwenden Sie hierzu die in Aufgabe 5 vervollständigten Matlab-Programme zum Steuern des Vektornetzwerkanalysators. Den  $25\ \Omega$ -Widerstand können Sie durch Parallelschalten zweier  $50\ \Omega$ -Abschlusswiderstände mit Hilfe eines T-Stücks realisieren. Diskutieren Sie die Ergebnisse!

## A. Materialliste

Neben einem Arbeitsplatzrechner mit Matlab und GPIB-Schnittstelle wird das in der Tabelle 2 aufgelistete Labormaterial benötigt. Die Versuchsanleitung und die zur Verfügung gestellten Matlab-Programmfragmente sind für den Vektornetzwerkanalysator ZVL von Rohde & Schwarz geschrieben. Eine Anpassung an die meisten anderen handelsüblichen Vektornetzwerkanalysatoren sollte jedoch leicht möglich sein.

Tabelle 2: Materialliste

Anzahl	Bezeichnung
1	Vektornetzwerkanalysator ZVL von Rohde & Schwarz mit Option B10 (GPIB-Schnittstelle)
1	OSM-Kalibrierkit N-female, zum Beispiel 53K34R-MSON3 von Rosenberger
1	Messtorkabel N-male
2	$50\ \Omega$ -Abschlusswiderstand N-male
1	T-Stück N-female

## B. Sicherheitshinweise

Hochfrequenztechnische Messgeräte sind empfindliche Präzisionsinstrumente. Zum Vermeiden von Beschädigungen sind folgende Hinweise zu beachten:

- Vermeiden Sie elektrostatische Aufladungen. Verwenden Sie Erdungsarmbänder.
- Berühren Sie niemals die Kontaktflächen der Steckverbinder. Drehen Sie zum Befestigen und Lösen der Steckverbinder nur die Überwurfmutter und nicht die Steckverbinder selbst.
- Überschreiten Sie niemals die maximal zulässigen Signalpegel. Diese finden Sie in den Datenblättern und häufig auch direkt am Gerät neben dem entsprechenden Anschluss. Beachten Sie, dass häufig keinerlei Gleichspannungen zulässig sind.

## Literatur

- [ES91] H.-J. Eul und B. Schiek. »A generalized theory and new calibration procedures for network analyzer self-calibration«. In: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 39.4 (Apr. 1991), S. 724–731.
- [Hie11] M. Hiebel. *Grundlagen der vektoriellen Netzwerkanalyse*. 3. Auflage. München: Rohde & Schwarz, 2011.
- [SCPI] *Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI)*. San Diego, CA: SCPI Consortium, 1999.
- [TG13] F. Thuselt und F. P. Gennrich. *Praktische Mathematik mit MATLAB, Scilab und Octave: für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin: Springer Spektrum, 2013.
- [Tre85] S. A. Tretter. »Estimating the frequency of a sinusoid by linear regression«. In: *IEEE Transactions on Information Theory* 31.6 (Nov. 1985), S. 832–835.